

## **РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИТУАЦИЙ ДОМЕННОГО ЦЕХА**

### **Аннотация**

*Рассмотрена архитектура построения автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Представлены характеристики и возможности отдельных подсистем для управления технологией доменной плавки.*

*Ключевые слова:* доменное производство, автоматизированные системы управления технологическими процессами, доменное производство, интеграция систем управления.

### **Abstract**

*The architecture of the computer-aided systems analysis and forecasting production situations blast furnace plant JSC «Magnitogorsk Iron and Steel Work». The characteristics and capabilities of the individual subsystems to control the blast furnace technology.*

*Keywords:* blast furnace, automated process control system for blast furnaces, control systems integration.

Современная тенденция развития науки и техники характеризуется развитием, внедрением и широким использованием компьютерных систем поддержки принятия решений в АСУП, в основу которых положены методы математического моделирования. Роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области металлургии MES–уровня (Manufacturing Execution Systems – системы управления технологией, производственными процессами) современных автоматизированных информационных систем крупнейших металлургических предприятий России в настоящее время становится все более очевидной.

Это определяет потребность в разработке информационно-моделирующих систем, основу которых составляет комплекс математических моделей, учитывающих как физику процесса, основы теории тепло- и массообмена, законы сохранения энергии, так и особенности влияния технологических и стандартных характеристик сырья на показатели производственного процесса. Особое место в этом комплексе технологических операций получения метал-

лопродукции отводится доменному переделу как самому энергоемкому и сложному, на долю которого приходится до 50 % топлива, используемого в черной металлургии.

В докладе отражены результаты создания и внедрения автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха на ОАО «ММК».

Построение системы основано на следующих основных принципах:

1. Система должна решать комплекс взаимосвязанных технологических задач. Инженерно-технологический персонал доменного цеха с помощью программного комплекса должен иметь возможность оперативно производить анализ работы металлургических агрегатов, оценивать текущее состояние хода технологического процесса, производить изучение и анализ наметившихся отклонений ключевых показателей, выявлять причины, повлекшие эти отклонения, и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности металлургического производства.

2. Обязательным требованием к системе является обеспечение простоты и легкости ее использования, поскольку большинство пользователей не являются специалистами в области информационных технологий и моделирования доменного процесса.

3. Непосредственную работу с системой осуществляют специалисты различных служб комбината, каждый из которых решает свои производственные задачи. В этой связи обязательным условием является наличие в системе модуля администрирования, разделения прав и категорий пользователей.

4. Для выполнения заложенных функций система взаимодействует с другими информационными системами комбината (АСУ ТП, КИС). Поэтому реализована возможность автоматического наполнения данными и передача данных между подсистемами, а также средства ее интеграции в корпоративную сеть предприятия.

5. В процессе эксплуатации системы предполагается ее непрерывное развитие (добавление новых показателей в отчеты, возможность их сопоставления, уточнение моделей и настройка их параметров на условия работы топливно-сырьевой базы комбината и пр.). Поэтому разработка системы выполнена на основе принципов модульного программирования с учетом современных технологий и средств программной реализации.

На основе вышеназванных принципов разработана структурная схема системы, представленная на рис. 1. Основными подсистемами являются:

- «Сбор и хранение данных», основной функцией которой является заполнение базы данных фактическими отчетными производственными показателями работы доменного производства;

- «Визуализация среднесменных и среднесуточных данных о работе доменных печей», которая обеспечивает построение графических трендов по выбранным пользователем параметрам в любой комбинации за указанный временной период;

- «Формирование технического отчета о работе доменных печей и цеха», предназначенная для формирования технического отчета о работе печей и цеха в целом за заданные периоды работы печей и цеха;

- «Сопоставление отчетных показателей работы доменных печей и цеха», которая обеспечивает возможность сравнения показателей работы цеха или печи по комплексу выбранных параметров за заданный временной период;

□ – источник данных; ○ – представление данных

– «Модельная поддержка принятия решений, прогнозирование технологических ситуаций и диагностика работы доменных печей». В основу реализации подсистемы положены алгоритмы расчета с использованием математических моделей доменного процесса для выбранного пользователем периода работы отдельных печей или цеха в целом. Анализ доменного процесса позволяет констатировать, что эта подсистема должна включать следующие взаимосвязанные подсистемы более низкого уровня декомпозиции: составление материальных балансов и теплового баланса доменной плавки; шлакового режима; газодинамического режима; теплового режима; оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов; оптимального выбора состава доменной шихты, а также диагностики хода доменной плавки. Каждая из этих подсистем взаимодействует с другими блоками параметров, подсистемами и внешней средой;

«Визуализация показателей работы доменного производства для OLAP» обеспечивает уполномоченным пользователям доступ ко всей отчетной информации по доменному производству в корпоративной сети предприятия.

Для программной реализации предложенной структуры требуется детальная проработка функциональности отдельных подсистем. С этой целью разработана обобщенная функциональная модель, в основу которой положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0. Использование этой методики позволило создать функциональные блоки отдельных подсистем, выявить производимые ими действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции. Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели АИС АППС ДЦ составляет 152. Декомпозиция модели выполнена до третьего уровня включительно. Фрагмент 1-го уровня декомпозиции функциональной модели представлен на рис. 2.

*Функция «Сбор и обработка данных» (A1)* обеспечивает автоматическое наполнение системы данными из АСУ ТП и корпоративной информационной системы (КИС). Сбор первичных данных производится в строго регламентированные моменты времени, которое установлено согласно требованиям инженерно-технологического персонала доменного цеха. Набор подключаемых параметров по конкретной доменной печи определяется условиями технического задания. В обработке данных участвуют работники различных подразделений комбината. Технологический персонал при выполнении этой функции руководствуется соответствующими технологическими инструкциями и руководствами пользователей существующих автоматизированных рабочих мест. Выходная информация служит источником для всех других подсистем.

*Функция «Визуализация данных» (A2)* обеспечивает возможность построения графических трендов фактических и основных технико-экономических показателей работы доменных печей и цеха по среднесменным и суточным данным. Выбор показателей работы осуществляется на основе требований пользователей системы и блока нормативно-справочной информации. Выполнение этой функции обеспечивают главным образом работники технологической группы доменного цеха. Результатом выполнения функции является набор отчетных документов с результатами визуальной оценки, а также численные данные, используемые для построения гистограмм.

*Функция «Технический отчет» (A3)* обеспечивает подготовку и формирование всех сведений о работе доменного цеха за календарный месяц или за период с начала текущего года до указанного месяца. Выполнение этой функции обеспечивается сотрудниками техно-

логической группы доменного цеха, информационно-вычислительного центра (ИВЦ) АСУ аглодоменного производства, энергоцеха, центральной лаборатории комбината (ЦЛК), экономистами доменного цеха. Выходом подсистемы являются отчетные документы по основным разделам доменного производства.

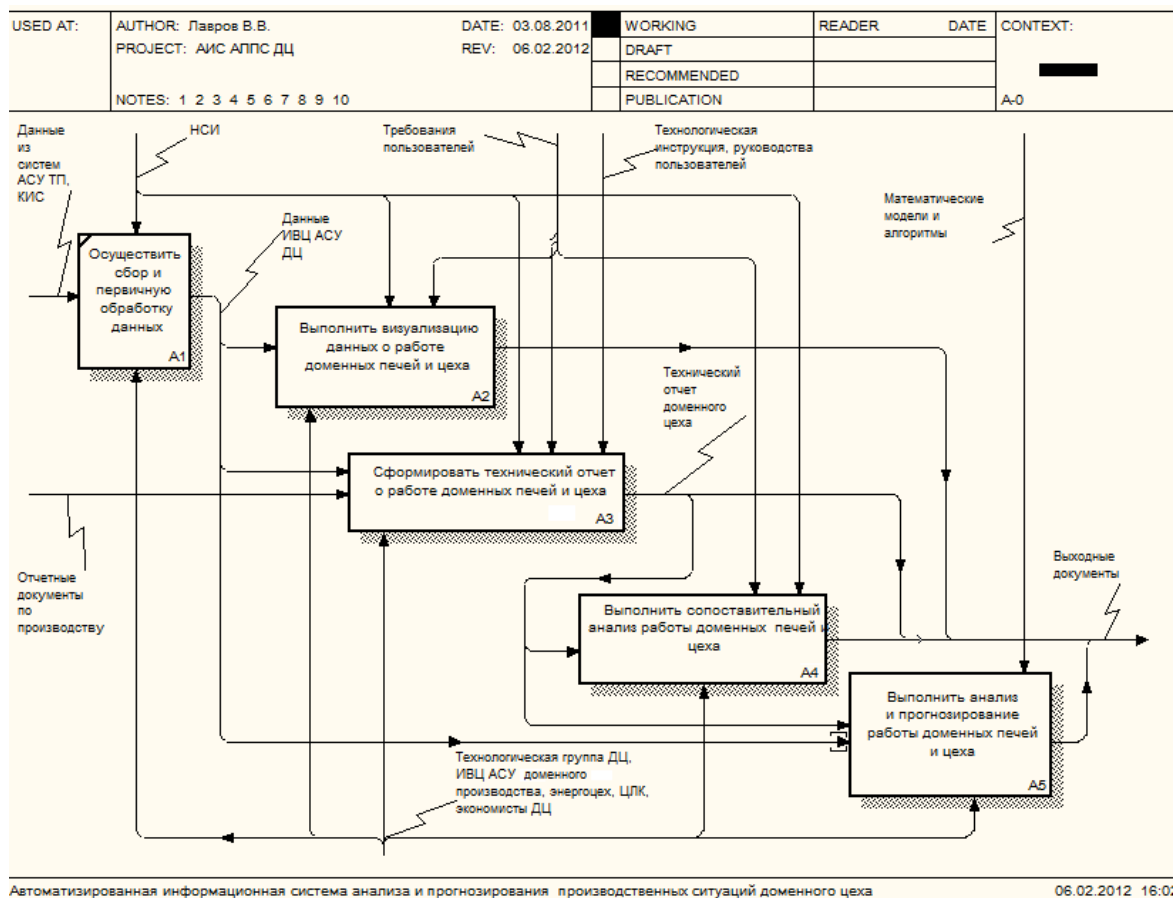


Рис. 2. Первый уровень декомпозиции функциональной модели АИС АППС ДЦ

Функция «Сопоставительный анализ» (A4) обеспечивает возможность сравнения отчетных показателей работы доменных печей за месяц или за период с начала календарного года до указанного месяца. Источником данных этой функции являются сведения о работе доменных печей, которые были подготовлены подсистемой «Технический отчет» и утверждены официально руководством доменного цеха.

Функция «Анализ и прогнозирование» (A5) позволяет проводить оценку и прогнозирование работы доменных печей и цеха в условиях, когда планируются изменения топливно-сырьевых условий их работы. Входные данные в эту подсистему поступают из подсистем A1 и A3. Обработку данных производят с помощью специального программного модуля, основу которого составляют математические модели теплового, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки. Результаты прогнозной оценки фиксируются в виде специальных табличных и графических форм, экспортированных в популярные форматы отчетных документов.

На основе анализа требований технологического персонала и нормативно-справочной информации доменного производства для каждого раздела формирования технического от-

чета разработано соответствующее математическое и алгоритмическое обеспечение, которое положено в основу программной реализации подсистемы отображения данных о работе отдельных доменных печей и цеха в целом.

Структурный системный анализ и проектирование блоков математических моделей выполнены на основе процедурно-ориентированного подхода. Основой данного подхода является использование диаграмм потоков данных DFD – информационной модели, основными компонентами которой являются потоки данных, переносящие информацию от одного модуля к другому. Нотация метода DFD предполагает разбиение математической модели на отдельные функциональные компоненты (процессы) и представление их в виде сети, связанной потоками данных.

*Моделирование свойств первичного шлака* включает блоки:

- определения температур начала плавления и конца размягчения железорудных материалов, толщины зоны вязкопластичного состояния материалов;
- расчета изменения количества и состава первичного шлака по высоте зоны вязкопластичного состояния материалов;
- расчета изменения вязкости первичного шлака по высоте зоны вязкопластичного состояния материалов.

При расчете состава и выхода первичного шлака приняты следующие допущения:

- 1) прямое восстановление оксида железа осуществляется при температуре выше 1000 °С, поэтому содержание монооксида железа при этой температуре ( $FeO_{лп}$ ) определяется степенью прямого восстановления;
- 2) зола кокса и флюсы не участвуют в процессах первичного шлакообразования, поэтому в расчете состава и выхода шлака эти компоненты не учитываются;
- 3) связь содержания монооксида железа и температуры расплава представлена экспоненциальной зависимостью.

Расчет температур начала размягчения и расплавления производился на основе опубликованных в литературе данных и известных эмпирических уравнений. При определении температурного интервала зоны вязкопластичного состояния материалов, толщины вязкопластичного состояния материалов были приняты допущения о том, что газодинамическую напряженность зоны вязкопластичных масс создает слой железорудных материалов с момента 50 %-ной усадки слоя, а также представление об экспоненциальном изменении температур в пределах нижней ступени теплообмена.

*Моделирование свойств конечного шлака* включает следующие расчетные блоки: определения выхода, состава и политермы вязкости конечного шлака; расчета десульфурющей способности шлака и содержания серы в чугуне; диагностики шлакового режима.

В основу расчета *выхода и состава шлака* (содержание в шлаке  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $TiO_2$ ) положены уравнения материальных балансов основных химических элементов и их соединений. Выход шлака рассчитывается по балансу шлакообразующих элементов.

В основе аналитического *расчета вязкости шлака* лежат математическая обработка диаграммы тройной шлаковой системы  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  при температурах 1400 и 1500 °С в области реальных значений доменных шлаков и известная зависимость вязкости гомогенных шлаковых расплавов от температуры. Предусмотрено введение поправки на содержание в шлаке других оксидов ( $MgO$  и др.).

**Оценка десульфуризирующей способности шлака и прогнозирование содержания серы в чугунах.** В основе прогнозирования изменения содержания серы в чугунах лежит баланс серы, который составляется из всех серосодержащих компонентов шихты, шлака и чугуна.

**Диагностика шлакового режима.** Способ диагностики шлакового режима при плавке перелитого чугуна заключается в следующем:

- если вязкость шлака при его температуре  $\eta_{\text{шл}}$  находится в пределах 0,2–0,5 Па·с, то шлак имеет нормальную вязкость при температуре шлака;

- если вязкость шлака при его температуре  $\eta_{\text{шл}}$  превышает  $\eta_{\text{шл}}^{\text{max}} = 0,5$  Па·с, то вязкость шлака превышает допустимые пределы для нормального режима плавки. Режим работы печи затруднен;

- если вязкость шлака при температуре шлака меньше  $\eta_{\text{шл}}^{\text{min}} = 0,2$  Па·с, то шлак характеризуется малой вязкостью, обладает высокой агрессивностью к огнеупорной кладке и разрушает гарнисаж;

- если уменьшение вязкости шлака при увеличении температуры шлака на 1 °С в диапазоне его вязкости 2,5–0,7 Па·с (градиент вязкости,  $\Delta\eta_{0,7}^{2,5}/\Delta t \geq 0,03$  Па·с/°С, то шлак относится к типу «коротких». Возможно загромождение горна, образование настывов, застывание шлака в желобах. Режим работы печи затруднен.

**Моделирование газодинамического режима.** Целью моделирования является оценка влияния параметров дутья и загружаемой шихты на перепад давления в доменной печи. В основе моделирования процессов газодинамики лежит общеизвестное линейаризованное уравнение Эгона, позволяющее оценить влияние параметров шихты, газа, расплава и характера взаимодействия между этими потоками. В качестве показателя предельной степени форсировки доменной плавки дутьем служит степень уравнивания шихты газовым потоком (СУ). Установлено, что задержки в сходе шихты с последующими самопроизвольными обрывами происходят для условий работы доменных печей ОАО «ММК» при превышении значения СУ = 0,55. Расчет изменения производительности печи в прогнозном периоде осуществляется, исходя из условия сохранения СУ шихты на прежнем уровне. При этом расчет выполняется с учетом изменения свойств шихтовых материалов и расплава.

**Оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей,** в частности инжектируемого топлива и технологического кислорода, в пределах группы доменных печей является актуальной задачей, поскольку технологические показатели работы отдельных печей существенно различаются. При заданном на доменный цех общем расходе этих ресурсов целесообразно иметь оперативную методику оценки эффективности использования указанных ресурсов на доменных печах и осуществлять их оптимальное распределение. В отличие от известных работ, в данной постановке в значительно большей степени учтены ограничения по тепловой работе «верха» ( $m$ ) и «низа» ( $Q_n$ ,  $T$ ) печи, химическому нагреву (содержание в чугунах Si), качеству чугуна (содержание в чугунах S), газодинамическим характеристикам работы печи ( $C_y$ ). При этом предельно допустимые значения параметров определяются методом экспертных оценок, что позволяет осуществлять настройку модели на реальный процесс путем формализации опыта инженерно-технического и технологического персонала. Расчет коэффициентов, определяющих приращение этих па-

раметров при единичных изменениях расходов природного газа, технологического кислорода, кокса и производительности, осуществляется по модели доменного процесса УрФУ.

**Оптимальный состав доменной шихты.** Оптимизационная модель включает в себя два основных компонента: целевую функцию и технологические ограничения на каждую доменную печь. Предусмотрены следующие варианты целевых функций:

- заданная основность конечного шлака:

$$Z = B \rightarrow B_{3Д} \quad , \quad X_{i, ш} \in G_{x_{ш}} \quad (1)$$

где  $i$  – индекс вида шихтовых материалов;  $X_{i, ш}$  – вектор, характеризующий виды, расходы и химический состав  $i$ -х материалов доменной шихты;  $X_{i, ш} \in G_{x_{ш}}$  – ограничения на параметры шихты заполнения, т.е. виды, химические составы, физические свойства загружаемых шихтовых материалов;  $G_{x_{ш}}$  – область допустимых решений параметров шихты;

- минимум содержания серы в чугуне:

$$Z = [S] \rightarrow \min \quad ; \quad X_{i, ш} \in G_{x_{ш}} \quad (2)$$

- минимум удельного расхода кокса:

$$Z = K \rightarrow \min \quad ; \quad X_{i, ш} \in G_{x_{ш}} \quad (3)$$

- максимум производительности:

$$Z = P \rightarrow \max \quad . \quad X_{i, ш} \in G_{x_{ш}} \quad (4)$$

Формирование технологических ограничений предусматривает учет и математическое описание ограничений на тепловой, газодинамический и шлаковый режимы плавки. В общем случае ограничения сводятся к следующему: реализация рационального газодинамического режима; обеспечение нормального шлакового режима; получение чугуна с допустимым содержанием в нем серы.

**Ограничения на тепловой режим.** При выборе ограничивающих факторов, характеризующих тепловой режим, предварительно отметим, что расход кокса в проектный период определялся с использованием корректировочных коэффициентов, что обеспечивает баланс тепла в целом по печи (или в лимитирующей нижней зоне печи). В связи с этим в качестве дополнительного параметра выбрана теоретическая температура горения на фурмах:

$$T^{\min} \leq T(X_d) \leq T^{\max}, \quad X_d \in G_{x_d}, \quad (5)$$

где  $X_d$  – вектор, характеризующий вид, расход и состав дутьевых параметров (влажность дутья, расход природного газа, технологического кислорода);  $G_{x_d}$  – области допустимых значений параметров дутья;  $T^{\min}$ ,  $T^{\max}$  – минимально и максимально допустимые значения теоретической температуры горения, °С.

**Ограничения на газодинамический режим.** При выборе дутьевых параметров (вектора  $X_d$ ), состава и свойств шихтовых материалов (вектора  $X_{i, ш}$ ) следует учитывать то обстоятельство, что не должен нарушаться газодинамический режим доменной плавки. Математически это означает, что степень уравнивания шихты газовым потоком  $CU(X_{i, ш}, X_d)$  не должна превышать максимально допустимого значения  $CU_{кр}$ :



$$CY(X_{i,ш}, X_o) \leq CY_{KP}. \quad (6)$$

Параметр  $CY_{KP}$  является настройкой модели.

*Ограничения на шлаковый режим:*

1) величина вязкости конечного шлака при температуре 1400 °С,  $\eta_{1400}$ , находится в интервале

$$\eta_{1400}^{\min} \leq \eta_{1400}(X_{i,ш}, X_o(\tau)) \leq \eta_{1400}^{\max}, \quad (7)$$

где  $\eta_{1400}^{\min}$ ,  $\eta_{1400}^{\max}$  – постоянные величины, минимально и максимально допустимые вязкости при температуре 1400 °С (при 1400 °С обеспечивается движение шлака через коксовую насадку);

2) величина вязкости конечного шлака при температуре 1500 °С,  $\eta_{1500}$ , находится в интервале:

$$\eta_{1500}^{\min} \leq \eta_{1500}(X_{i,ш}, X_o(\tau)) \leq \eta_{1500}^{\max}, \quad (8)$$

где  $\eta_{1500}^{\min}$ ,  $\eta_{1500}^{\max}$  – постоянные величины, минимально и максимально допустимые вязкости при температуре 1500 °С (ограничение обусловлено тем, что температуру 1500 °С имеет выпускаемый из печи конечный шлак);

3) градиенты вязкости не превышают допустимых значений:

$$\Delta\eta_7^{25} \leq (\Delta\eta_7^{25})^{\max}, \quad (9)$$

$$\Delta\eta_{1400}^{1500} \leq (\Delta\eta_{1400}^{1500})^{\max}, \quad (10)$$

где  $\Delta\eta_7^{25} = \frac{25-7}{t_{шл}^7 - t_{шл}^{25}}$  – градиент-1 вязкости шлака, численно равный уменьшению вязкости шлака при увеличении температуры шлака на 1 °С в диапазоне вязкости шлака 2,5–0,7 Па·с, Па·с/°С;  $\Delta\eta_{1400}^{1500} = \frac{\eta_{1400} - \eta_{1500}}{1500 - 1400}$  – градиент-2 вязкости шлака, численно равный изменению вязкости шлака при изменении температуры шлака на 1 °С в пределах 1400–1500 °С, Па·с/°С;  $(\Delta\eta_7^{25})^{\max}$ ,  $(\Delta\eta_{1400}^{1500})^{\max}$  – постоянные величины, максимально допустимые величины соответственно градиента-1 и градиента-2 вязкости шлака, Па·с/°С.

*Ограничения на качество выплавляемого чугуна.* Оценивается по содержанию серы в чугуне  $[S](X_{i,ш}, X_d)$ . Оно не должно превышать допустимого предела  $[S]_{зад}$ :

$$[S](X_{i,ш}, X_d) \leq [S]_{зад}. \quad (11)$$

*Ограничения на условие шихтовки.* Сумма весовых долей компонентов  $G_i^{жс}$  железорудной части шихты равна единице, т.е.

$$\sum_{i=1}^n G_i^{жс} = 1. \quad (12)$$

Разработанное обеспечение позволяет формировать полный набор отчетных показателей работы доменных печей и цеха и решать технологические задачи по управлению тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной плавки.

В результате с использованием современной технологии разработки и программных инструментальных средств создана и внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию си-

стема анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», которая предоставляет в распоряжение инженерно-технологического персонала современный инструмент оперативного анализа отчетных показателей работы. Использование разработанной системы позволяет инженерно-технологическому персоналу оперативно проводить анализ производственных ситуаций доменного цеха, решать задачи управления технологией доменной плавки, что в конечном итоге обеспечивает повышение технико-экономических показателей работы доменного производства.

### Список использованных источников

1. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Н. А. Спирин, В. В. Лавров, В. Ю. Рыболовлев, А. В. Краснобаев, О. П. Онорин, И. Е. Косаченко; под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
2. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О. П. Онорин, Н. А. Спирин, В. Л. Терентьев и др.; под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
3. Информационные системы в металлургии / Н. А. Спирин, Ю. В. Ипатов, В. И. Лобанов и др.; под ред. Н. А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
4. Создание программного комплекса «АРМ технолога доменного цеха» на основе современных информационных технологий / В. В. Лавров, Н. А. Спирин, А. А. Бурыкин, А. В. Краснобаев // Сталь. 2010. № 1. – С. 17–21.
5. Одинцов И. О. Профессиональное программирование. Системный подход. 2-е изд. перераб. и доп. / И. О. Одинцов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
6. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. 8-е изд. / К. Дж. Дейт. – М.: Вильямс, 2006. – 1328 с.
7. Повышение эффективности работы доменного цеха за счет оптимального использования топливно-энергетических ресурсов / В. В. Лавров, Н. А. Спирин, И. А. Бабин, А. И. Перминов, А. А. Бурыкин // Сталь. 2008. № 4. – С. 10–14.
8. Ларсон Б. Microsoft SQL Server 2005 Reporting Services. Традиционные и интерактивные отчеты. Создание, редактирование и управление / Б. Ларсон. – М.: НТ Пресс, 2008. – 608 с.
9. Разработка системы отображения отчетных показателей доменного производства на основе Reporting Services / В. В. Лавров, Н. А. Спирин, А. А. Бурыкин, А. В. Краснобаев // Известия Томского политехнического университета. 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 68–73.